

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Dino Pongrac

SCHLIERENOVA KAMERA

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I TEHNIKA

Dino Pongrac

Diplomski rad

Schlierenova kamera

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Nikola Poljak

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Nikoli Poljaku na pomoći, konzultacijama i savjetima pri izradi ovoga diplomskog rada.

Neizmjereno zahvaljujem roditeljima i obitelji koji su mi uvijek bili podrška, vjerovali u mene, naročito u trenucima kada je nestalo vjere u meni.

Zahvaljujem Kristini koja mi je uvijek dala motivacije u trenucima kada je nestalo moje.

Na kraju hvala prijateljima, prijateljicama, kolegama i kolegicama uz koje studentski život ne bi bio toliko zanimljiv.

Sažetak

Schlierenova kamera uređaj je koji služi za snimanje relativnih tokova fluida različitih gustoća. U diplomskom radu opisali bi se efekti kojima se služi uređaj, izradila bi se kamera pomoću digitalnoga fotoaparata i optičkih elemenata te bi se na kraju izvršila mjerenja ovisnosti vertikalne brzine stupca zraka o različitim parametrima. Uređaj bi se rastavio zbog svoje osjetljivosti, no mjerenja izvršena njime služila bi za demonstracijske svrhe u nastavi.

Ključne riječi: zrcala, kamera, lom svjetlosti, optika, toplina, konvekcija topline

Schlieren camera

Abstract

A schlieren camera is a device used for recording a relative flow of fluids with differing densities. This thesis describes the effects used in the device, which was made by using a digital camera and several optical elements. In the end, measurements of the dependance of the vertical velocity of the air on various parameters are performed. The device will be disassembled due to its sensitivity, but the measurements would serve for demonstration purposes in the classroom.

Keywords: mirrors, camera, diffraction, optics, heat, heat convection

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Povijest	2
3. Teorija.....	4
3.1. Odbijanje i lom svjetlosti	4
3.2. Sferna zrcala	8
3.3. Konstrukcija slike na konkavnomu zrcalu	13
4. Opis postava eksperimenta	15
4.1. Oštar rub	19
5. Tijek eksperimenta	22
6. Snimke	27
7. Određivanje temperature plamena alkohola	34
8. Metodički dio.....	39
8.1. Primjena schlierenove kamere u nastavi fizike.....	39
8.2. Nastavna priprema	40
9. Zaključak	45
10. Literatura	46

1. Uvod

Kad se zimi grije, može se vidjeti kako peć ili radijator *isijavaju*. Slično se može vidjeti i kad se ljeti pogleda vrući lim automobila. Čovjek oduvijek ima težnju za objašnjavanjem nepoznatoga oko sebe pa je tako u ovom radu riječ o tomu kako se može *vidjeti nevidljivo*.

Schlieren metoda tehnika je koja se koristi pri vizualizaciji varijacija optičke gustoće jednoga ili više medija. Ova metoda već se dugo koristi pri promatranju lomljenja svjetlosti kad prolazi kroz fluide različitih optičkih gustoća. Kao što je već spomenuto, neki se efekti mogu vidjeti bez ikakve pomoći i eksperimentalnoga postava. Bez obzira na to, uz pomoć jednostavno dizajniranoga postava, može se omogućiti puno bolji pogled na ovaj efekt. Upravo je takav jednostavno dizajnirani postav glavna tema ovoga rada – Schlierenova kamera. Pomoću ovoga postava promatran je efekt koji se postiže varijacijama u temperaturi i varijacijama u kemijskomu sastavu medija. Fokus je najviše na varijacijama u temperaturi jer je taj efekt najvidljiviji zbog najvećega utjecaja temperature na indeks loma u zraku. Nadalje, može se promatrati efekt koji se postiže gradijentom tlaka (primjerice, zvuk ili let projektila), ali zbog tehničkih zahtjevnosti taj efekt nije vidljiv postavom koji se koristi u ovom radu.

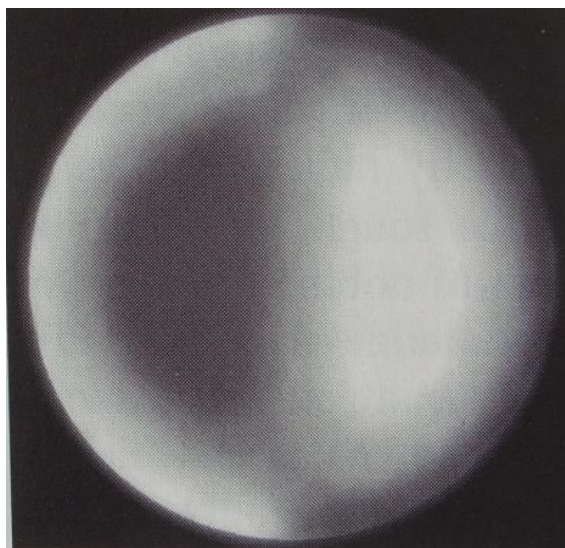
Nakon povijesnoga pregleda, u radu slijedi poglavlje s teorijskim dijelom u kojemu će biti objašnjeni neki fizikalni principi i efekti čije je razumijevanje bitno za uspješno shvaćanje ovoga eksperimenta i rada. Nakon teorijskoga dijela slijedi opis ustroja eksperimentalnoga postava, načina na koji je sam postav sastavljen i snimanje digitalnom kamerom. Nadalje, pokušalo se i odrediti temperaturu plamena uz pomoć vertikalne brzine stupca zraka da bi potom uslijedio metodički dio koji uključuje opis upotrebe Schlierenove kamere u nastavi i metodičku pripremu za nastavni sat. U zaključku je ukratko objašnjeno što je pokazano ovim eksperimentom.

Pri izvođenju pokusa, savjetima i sugestijama pripomogao mi je mentor doc. dr. sc. Nikola Poljak.

2. Povijest

Iako se ne zna s potpunom sigurnošću tko je prvi primijetio kako se svjetlost lomi ovisno o temperaturi zraka, može se pretpostaviti da je to bilo prije više tisuća godina kad su praljudi promatrali gorenje vatre. Od toga su trenutka prošle tisuće godina, sve do 17. stoljeća, kad se ovaj efekt počeo znanstveno proučavati.

Jedan od najpoznatijih i najsvestranijih znanstvenika 17. stoljeća, suvremenik Isaaca Newtona, bio je Robert Hooke (1635-1703). Hooke je zanimalo kako je moguće vidjeti tok vrućega zraka oko plamena svijeće. U knjizi *Micrographia* opisao je taj fenomen. Stoljećima se za testiranje leća prilikom proizvodnje koristila metoda koju je uveo nizozemski astronom i fizičar Christiaan Huygens (1629-1695). Njegova metoda bila je jako slična schlierenovoj. Metoda se koristila za uočavanje defekata na lećama. Male neregularnosti na lećama rezultirale bi promjenom intenziteta svjetlosti na zaslonu (Slika 1).



Slika 1. Neregularnosti na leći [1].

Francuski fizičar Leon Foucault (1819-1868) unaprijedio je ovu metodu blokiranjem polovice svjetlosti oštrim rubom u žarišnoj točki. Njegova metoda pokazala se temeljem schlierenove metode u fizici. Šezdesetih godina devetnaestoga stoljeća njemački je fizičar August Toepler (1836-1912) izumio prvi napredniji schlierenov sistem za vizualizaciju toka. Razvijanjem Foucaultova sistema i upotrebom filtera, uspio je znatno povećati osjetljivost, kvalitetu i kontrast u usporedbi s Hookeovim sistemom. Budući da kamere još nisu bile dovoljno kvalitetne, gledalo se direktno okom. Toepler se smatra

ocem schlierenovih sistema. Upravo je on efektu dao ime – *schlieren* – po njemačkoj riječi *Schliere*, što znači pruga. Budući da je njegovom metodom znatno poboljšano proučavanje tokova i valova u fluidima, u dvadesetomu stoljeću ta je metoda postala važan alat u području aerodinamike. Danas se više ne koristi u takvoj mjeri jer se razvitkom računala danas češće koriste računalne simulacije. [1,2]

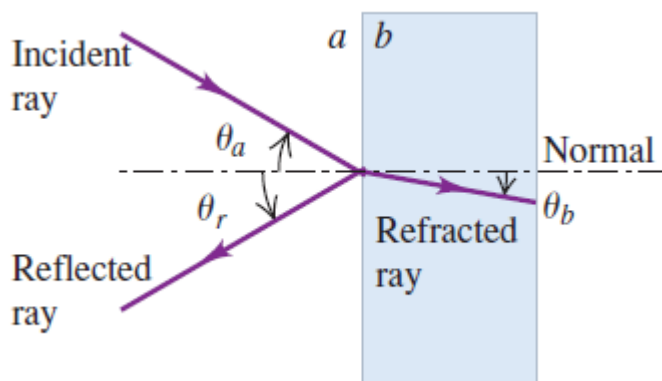
3. Teorija

Da bi se eksperiment shvatio u potpunosti, potrebno je najprije navesti i protumačiti nekoliko pojava vezanih uz samu prirodu i propagaciju svjetlosti te geometrijsku optiku.

3.1. Odbijanje i lom svjetlosti

Dva najvažnija aspekta propagacije svjetlosti su odbijanje (refleksija) i lom (refrakcija) svjetlosti. Kad zraka svjetlosti dođe do granice koja razdvaja dva prozirna materijala (npr. zrak i voda, zrak i staklo), dio te zrake djelomično se odbija, a dio prolazi u drugi materijal (primjerice, kad se promatra mirna površina vode nekoga jezera u plićaku, vidljiv je odraz na površini vode, ali i dno jezera).

U nastavku (Slika 2) prikazan je smjer upadne (engl. *incident ray*), odbijene (reflektirane, engl. *reflected ray*) i lomljene (refraktirane, engl. *refracted ray*) zrake na granici između dvaju materijala.



Slika 2. Prikaz upadne, reflektirane i refraktirane zrake na granici dvaju materijala [3].

Upadna zraka svjetlosti dolazi iz zraka do nekoga materijala (primjerice, stakla) i zatvara kut θ_a s okomicom (engl. *normal*) u odnosu na ravninu koja predstavlja granicu između dvaju materijala. Dio zrake odbit će se od materijala pod jednakim kutom u odnosu na okomicu θ_r kao i upadna zraka:

$$\theta_r = \theta_a \quad (1)$$

Zraka koja se odbija naziva se odbijena ili reflektirana zraka, a relacija iznad (1) naziva se zakonom refleksije. Zakon refleksije vrijedi za sve valne duljine svjetlosti i za bilo koji par materijala kroz koji svjetlost putuje.

Drugi dio zrake prolazi kroz granicu dvaju materijala. Ako se usporedi kut θ_b koji s okomicom zatvara zraka koja je prošla u materijal, može se primijetiti da kut nije jednak kutu θ_a koju s okomicom zatvara upadna zraka:

$$\theta_a \neq \theta_b \quad (2)$$

Do takve situacije dolazi zato što svjetlost putuje različitim brzinama u različitim medijima, tj. materijalima. Brzina svjetlosti najveća je u vakuumu i iznosi $c = 299\,792\,458$ m/s. Brzina svjetlosti u svakomu materijalu manja je od brzine svjetlosti u vakuumu.

Budući da je kut θ_b različit od kuta upadne zrake θ_a , nastaje dojam kao da se zraka slomila i zbog toga se zraka koja je prošla u materijal naziva *lomljena zraka* ili refraktirana zraka, a kut θ_b kut loma ili kut refrakcije. Zbog različite brzine svjetlosti u raznim optičkim materijalima, uvodi se indeks loma za optičke materijale. *Indeks loma* nekoga materijala označava se sa n i „on ima glavnu ulogu u geometrijskoj optici“ [3], a definira se kao omjer brzine svjetlosti u vakuumu c i brzine svjetlosti u nekomu materijalu v :

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

S obzirom na to da je n omjer brzina, indeks loma nema mjernu jedinicu. Indeks loma za vakuum je $n = 1$, a za sve ostale materijale je $n > 1$ jer je brzina svjetlosti u bilo kojemu drugom materijalu manja od brzine svjetlosti u vakuumu. Promatrajući eksperimentalno indekse loma i kutove upadnih i lomljenih zraka, definiran je *zakon loma* – omjer sinusa upadnoga kuta θ_a i kuta loma θ_b jednak je inverznomu omjeru indeksa loma optičkoga materijala kroz koji zraka prolazi:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (4)$$

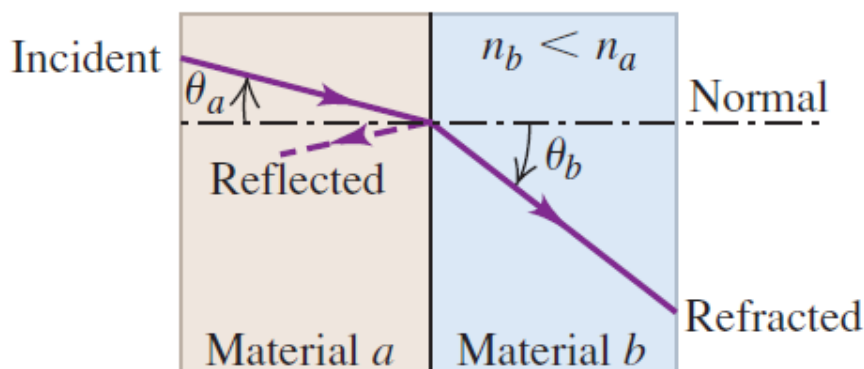
ili

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (5).$$

Relacije (4) i (5) još se nazivaju i *Snellov zakon*. U ovim relacijama n_a i n_b označavaju indekse lomova u nekomu optičkom materijalu a i optičkomu materijalu b . Ako je indeks loma u optičkomu materijalu a manji od indeksa loma u optičkomu materijalu b ($n_a < n_b$), za materijal a kaže se da je *optički rjeđe sredstvo*, a za materijal b kaže se da je *optički*

gušće sredstvo [3]. U tomu slučaju, prema Snellovu zakonu (5), upadni kut θ_a veći je od kuta loma θ_b . Ovaj slučaj prikazan je na Slici 2.

Ako postoji obrnuta situacija tako da je indeks loma materijala a veći od indeksa loma materijala b ($n_a > n_b$), prema Snellovu zakonu (5), u tome je slučaju upadni kut θ_a manji od kuta loma θ_b (Slika 3).



Slika 3. Refleksija i refrakcija svjetlosti gdje materijal b ima manji indeks loma od materijala a [3].

Na optičku gustoću, tj. indeks loma utječe više parametara kao što su primjerice vrsta materijala, kemijski sastav tvari, tlak fluida i temperatura fluida.

Za idealne plinove, relacija koja povezuje indeks loma s gustoćom je:

$$n - 1 = k\rho \quad (6)$$

Pri čemu je n indeks loma, ρ je gustoća plina, a k je Gladstone-Dale koeficijent koji je specifičan za svaki plin.

Jednadžba stanja idealnog plina je:

$$pV = nRT \quad (7)$$

pri čemu je p tlak plina, V je obujam, n je množina tvari, R je konstanta, a T je temperatura plina. Relaciju (7) može se zapisati pomoću gustoće:

$$p = \rho \frac{R}{M} T \quad (8)$$

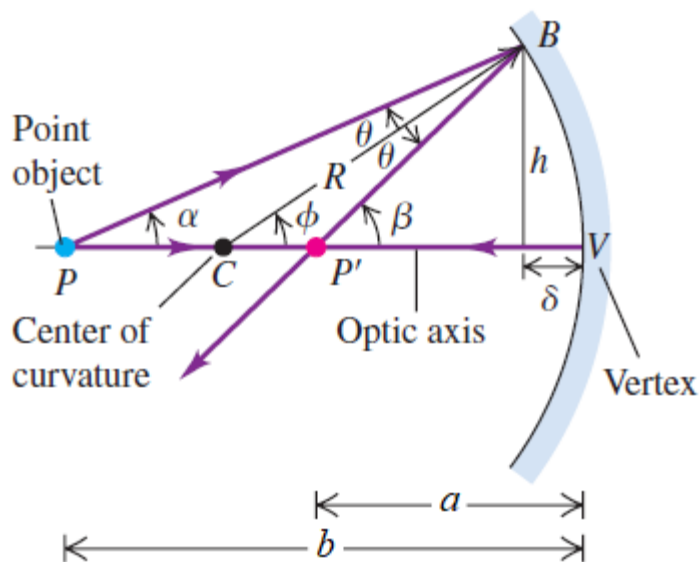
Uvrsti li se relacija (8) u relaciju (6) dobije se veza:

$$n - 1 \sim \frac{p}{T} \quad (9)$$

Ova veza (9) teoretski nam govori da će indeks loma plina biti manji povećamo li temperaturu plina, te da će indeks loma biti veći povećanjem tlaka plina [1, 2].

3.2. Sferna zrcala

Ravna zrcala stvaraju sliku jednake veličine kao što je i predmet, isto tako, koliko je predmet udaljen od zrcala, toliko je i sama slika udaljena od zrcala. Uz ravna zrcala postoje još i zakrivljena ili *sferna* zrcala. Jednostavna sferna zrcala mogu se zamisliti kao dio kugle ili sfere koja ima reflektirajuću površinu s vanjske strane kugle ili s unutarnje strane kugle. Sferno zrcalo koje je zakrivljeno tako da mu je reflektirajuća površina s unutarnje strane kugle naziva se konkavno zrcalo, a sferno zrcalo koje zakrivljeno tako da mu je reflektirajuća površina s vanjske strane zrcala, naziva se konveksno zrcalo. Za potrebe ovoga rada opisani su principi rada konkavnoga zrcala (Slika 4) jer će isto biti i upotrijebljeno.



Slika 4. Konstrukcija slike na konkavnom zrcalu [3].

Ako se zamisli kugla koja ima reflektirajuću površinu s unutarnje strane, točka C je središte toga zrcala koja se naziva centrom zakrivljenosti zrcala. Dužina CB onda je jednaka polumjeru R . Točka V naziva se tjeme zrcala (engl. *vertex*), a pravac na kojem leže točke C i V naziva se optička os. Točkasti predmet čija se slika traži nalazi se u točki P . Pretpostavka je da je udaljenost predmeta od tjemena veća od polumjera zrcala. Jedna zraka svjetlosti prolazi od predmeta P kroz točku C do točke V . Ta zraka PV dolazi okomito do tjemena i prema zakonu refleksije (1), zraka se odbija u samu sebe (Slika 4). Zraka PB zatvara kut α s optičkom osi i dolazi do zrcala u točki B . Dužina CB ujedno je i okomica na tangentu u točki B tako da kutovi θ moraju biti jednaki prema zakonu refleksije. Odbijena zraka siječe optičku os u točki P' i upravo se u toj točki nalazi slika

predmeta. Udaljenost predmeta P do tjemena V je a , a udaljenost slike do tjemena je b . Budući da su a , b i R s iste strane zrcala, za njih se kaže da su pozitivni.

Ako se primijeni teorem da je vanjski kut trokuta jednak zbroju dvaju unutarnjih nasuprotnih kutova na trokute PBC i $P'BC$ slijedi:

$$\phi = \alpha + \theta \quad (10)$$

i

$$\beta = \theta + \phi \quad (11)$$

Zbroje li se jednačbe (10) i (11) dobije se:

$$\alpha + \beta = 2\phi \quad (12).$$

Udaljenost točke B od optičke osi označena je kao h , a δ označava udaljenost od tjemena do točke u kojoj h siječe optičku os. Sada se mogu zapisati tangensi kutova α , β i ϕ :

$$\tan \alpha = \frac{h}{a - \delta} \quad (13),$$

$$\tan \beta = \frac{h}{b - \delta} \quad (14),$$

$$\tan \phi = \frac{h}{R - \delta} \quad (15).$$

Ako se pretpostavi da je kut α mali, onda su i kutovi β i ϕ mali. Budući da je teško algebarski riješiti relacije (13), (14) i (15) i budući da su kutovi mali, može se aproksimirati da je tangens malih kutova jednak samim kutovima. Također, ako je pretpostavljeno da je α mali kut, tada se može zanemariti δ u odnosu na a , b i R . Za takve male kutove proizlazi aproksimacija:

$$\alpha = \frac{h}{a} \quad (16),$$

$$\beta = \frac{h}{b} \quad (17),$$

$$\phi = \frac{h}{R} \quad (18).$$

Uvrste li se relacije (16), (17) i (18) u relacije (13), (14) i (15) i podijeli li se sa h dobije se relacija koja povezuje a , b i R :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} \quad (19).$$

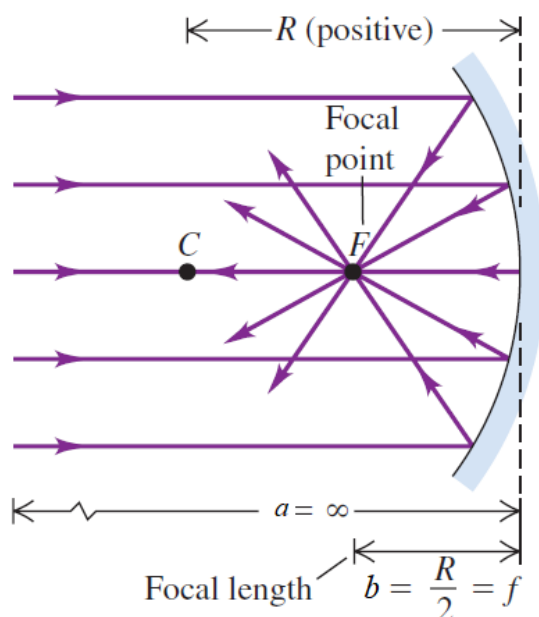
Ovo je jednačba koja povezuje udaljenost predmeta od zrcala a , udaljenost slike od zrcala b i polumjer zakrivljenosti zrcala R . Polovica udaljenosti od točke R do tjemena V naziva se žarišna daljina (engl. *focal length*) i označava se sa slovom f :

$$f = \frac{R}{2} \quad (20).$$

Uvrsti li se relacija (20) u relaciju (19) dobije se relacija:

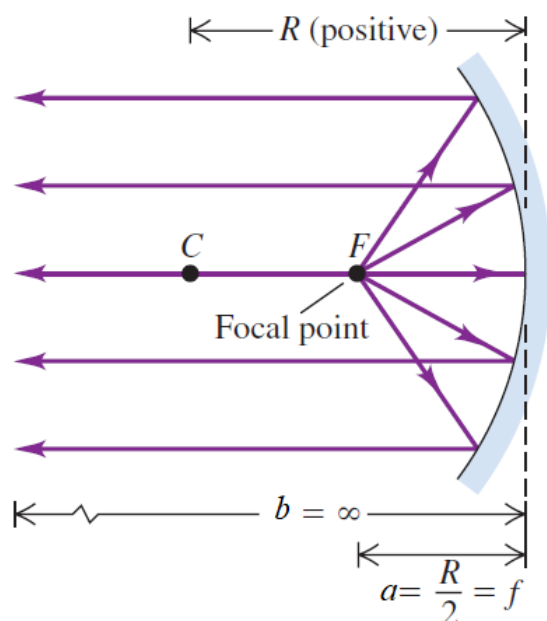
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (21).$$

Ako postoji paralelni snop zraka ($a = \infty$) koji dolazi do konkavnoga zrcala (Slika 5), prema relaciji (21) sve zrake bi se trebale sjeći u točki koja ima udaljenost f od tjemena i naziva se žarište zrcala (engl. *focal point*). Označava se slovom F .



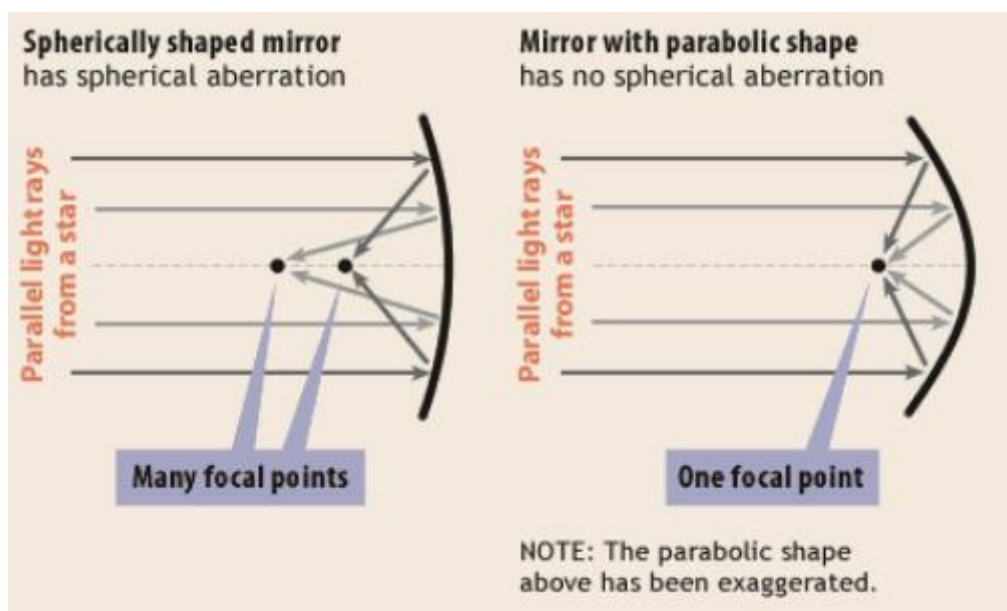
Slika 5. Snop paralelnih zraka koje upadaju na konkavno zrcalo i odbijanje zraka [3].

Ako postoji slučaj gdje se zrake svjetlosti šire iz samoga žarišta ($a = f$), tada se prema relaciji (21) zrake koje se odbijaju od zrcala šire paralelno s optičkom osi (Slika 6).



Slika 6. Snop zraka koje se šire iz žarišta zrcala i odbijaju se od zrcala [3].

Budući da su relacije (16), (17) i (18) aproksimativne, za veće kutove α , sferno zrcalo neće formirati potpuno točkastu sliku točkastoga predmeta ili izvora svjetlosti. Takvo svojstvo sfernoga zrcala naziva se *sferna aberacija*. Ovo svojstvo može se izbjeći ili minimizirati ako se koriste posebna zrcala koja nisu potpuno sferna, već su parabolična.



Slika 7. Sferno zrcalo (lijevo) i parabolično zrcalo (desno) [8].

Na slici iznad (Slika 7) vidljivo je kako kod sfernoga zrcala dolazi do sferne aberacije. Vidljivo je kako postoji više žarišnih točaka i iz toga razloga slika predmeta nije potpuno

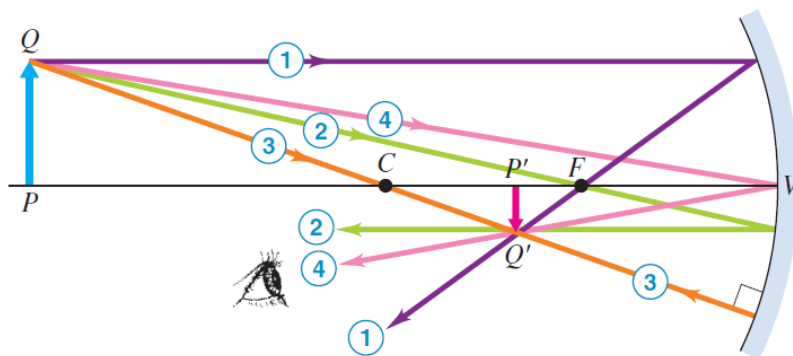
oštra, već je zamućena (Slika 8). Kod paraboličnoga zrcala sve se zrake sijeku u jednoj točki – žarištu i dobiva se oštra slika predmeta.



Slika 8. Slika galaksije M100 snimljene s Hubble teleskopom sa sfernom aberacijom (lijevo) i nakon korigiranja (desno) [9].

3.3. Konstrukcija slike na konkavnomu zrcalu

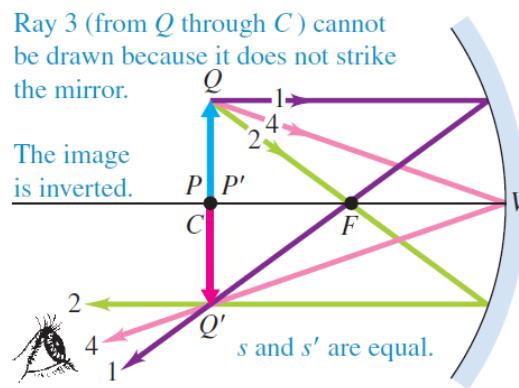
U ovome potpoglavlju opisano je kako se općenito dobiva slika nekoga predmeta na konkavnomu zrcalu. Predmet je postavljen na optičku os zrcala na udaljenost veću od polumjera zakrivljenosti zrcala (Slika 9).



Slika 9. Konstrukcija slike na konkavnomu zrcalu [3].

Točka C centar je zakrivljenosti zrcala, a točka F žarište je zrcala. Predmet na slici predstavlja plava strelica omeđena točkama PQ . Prate se četiri karakteristične zrake za konstrukciju slike na zrcalu. Zraka 1 putuje od predmeta paralelno s optičkom osi, dolazi do zrcala i odbija se od zrcala na način da odbijena zraka prolazi kroz žarište zrcala. Zraka 2 putuje od predmeta tako da prolazi kroz žarište, dolazi do zrcala i odbija se tako da odbijena zraka putuje paralelno s optičkom osi. Zraka 3 putuje od predmeta do zrcala tako da prolazi centrom zakrivljenosti zrcala, dolazi do zrcala i odbija se u samu sebe. Zraka 4 putuje od predmeta do tjemena zrcala tako da zraka s optičkom osi zatvara kut (upadni kut). Zraka se u tjemenu reflektira od zrcala pod jednakim kutom u odnosu na optičku os kao i upadna zraka. Sve odbijene zrake sijeku se u jednoj točki Q' . Strelica $P'Q'$ slika je predmeta. U ovom je slučaju slika umanjena, realna i obrnuta.

Za ovaj je rad posebno zanimljiv slučaj kada se predmet nalazi u centru zakrivljenosti (Slika 10).



Slika 10. Konstrukcija slike na konkavnomu zrcalu
kada je predmet u centru zakrivljenosti [3].

Ako se nacrtaju već spomenute četiri karakteristične zrake, vidljivo je da je slika predmeta jednako udaljena od zrcala kao i predmet, da je slika realna, jednake veličine i obrnuta. Zašto je bitno da predmet i slika budu točno u centru zakrivljenosti pri čemu je udaljenost od zrcala $2f$, opisano je u poglavlju 4.

4. Opis postava eksperimenta

Postoji više načina kojima se može ostvariti Schlierenova kamera (metoda), a u ovom radu opisana je i ostvarena jedna od najjednostavnijih i najdostupnijih. Postav eksperimenta uključuje parabolično zrcalo iz teleskopa polumjera zakrivljenosti $R = 2f = 128$ cm. Zrcalo je djelomično oštećeno (Slika 11), ali to ne utječe znatno na kvalitetu slike.



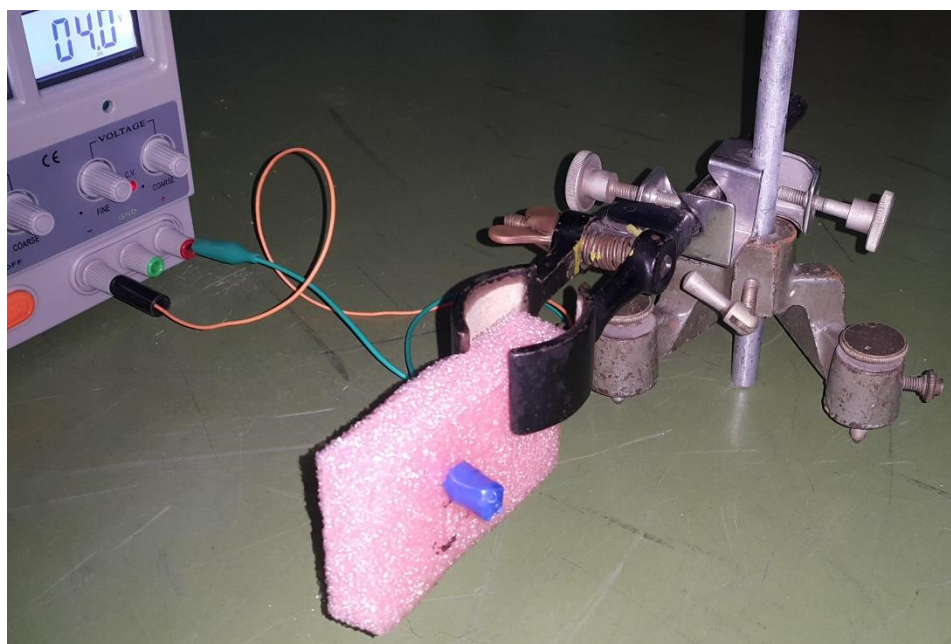
Slika 11. Parabolično zrcalo polumjera zakrivljenosti $2f = 128$ cm. Vidljivo je malo oštećenje.

Kao izvor svjetlosti koristimo LED žarulju koja je prekrivena izolacijskom ljepljivom trakom (Slika 12). Traka ima malen otvor jer želimo postići što manji točkasti izvor svjetlosti.



Slika 12. LED žarulja prekrivena izolacijskom ljepljivom trakom.

LED žarulja postavljena je na plastičnu spužvu koju drži laboratorijski stalak (Slika 13). Kao izvor energije za LED žarulju poslužio je ispravljač na koji smo postavili napon na otprilike $V \approx 4 \text{ V}$ (Slika 13. i 14).



Slika 13. LED žarulja, plastična spužva, stalak i ispravljač istosmjerne struje.



Slika 14. Ispravljač istosmjerne struje.

U postavu je još korišten i žilet ili oštrica skalpela koji ima ulogu oštrog ruba čime smo prekrili polovinu zraka koje dolaze do kamere (Slika 15). Uloga žileta objašnjena je detaljnije u poglavlju 4.1.



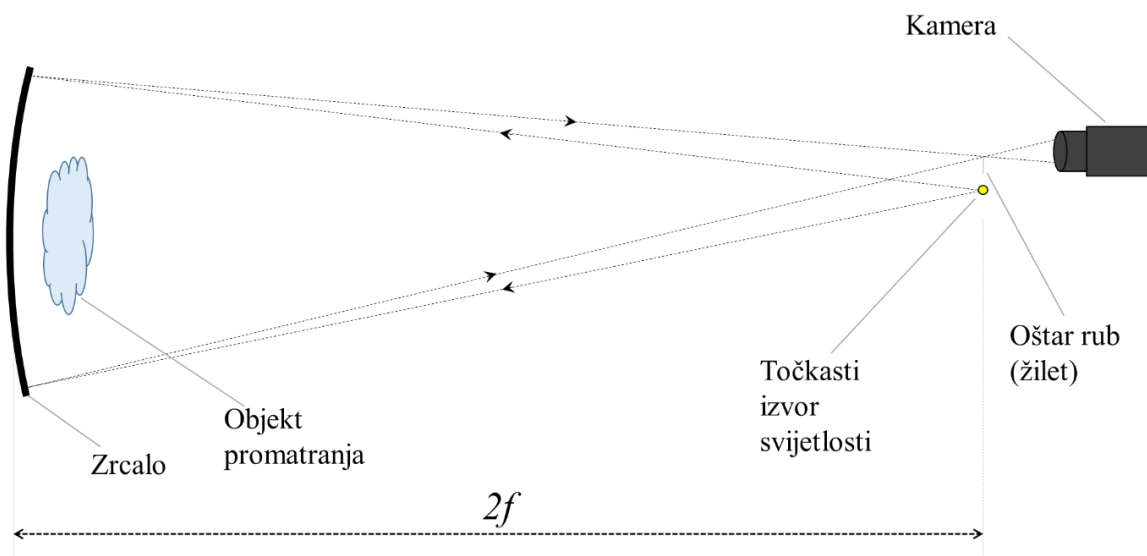
Slika 15. Žilet i kamera.

I zadnje, korištena je DSLR digitalna kamera Pentax K-70 (Slika 16).



Slika 16. Kamera i oštrica skalpela.

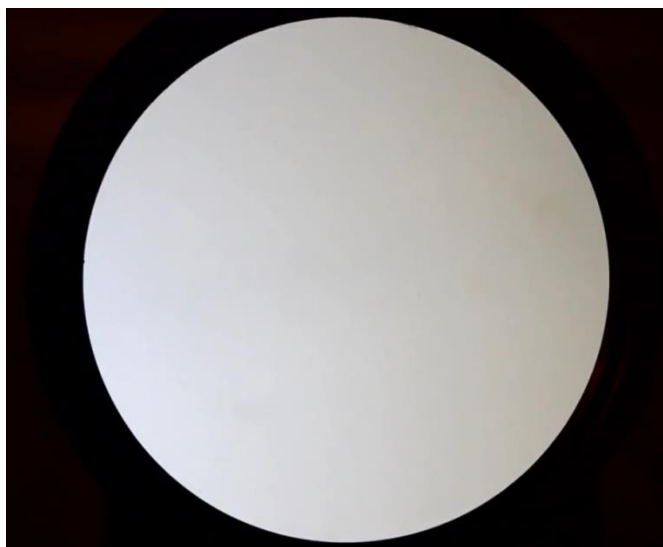
Na slici ispod (Slika 17) prikazana je skica postava.



Slika 17. Skica postava eksperimenta.

Izvor svjetlosti, u ovom slučaju LED žarulja, emitira svjetlost prema zrcalu i ako je udaljenost između izvora svjetlosti i zrcala jednaka dvije žarišne duljine $2f$, tada će i slika izvora svjetlosti biti također na istoj udaljenosti $2f$. Ako ne postoji nikakav predmet ili prepreka, svjetlost će se odbiti od zrcala i fokusirati u točku koja je udaljena $2f$ od zrcala. Na tom mjestu postavili smo kameru koja je na malo većoj udaljenosti od $2f$ jer kamera

ima svoju leću koja će opet fokusirati svjetlost u jednu točku. Dakle, svjetlost se širi iz izvora, ako ne postoje nikakve prepreke, svjetlost dolazi do zrcala, odbija se od zrcala, fokusira se u jednoj točki i dolazi do kamere i trebala bi se vidjeti na kameri uniformna distribucija svjetlosti na zrcalu (Slika 18).



Slika 18. Uniformna distribucija svjetlosti na visokokvalitetnomu zrcalu [10].

Naravno, to najviše ovisi o samoj kvaliteti zrcala. Ako se ispred zrcala stavi prepreka, odnosno prozirna tvar s indeksom loma različitim od indeksa loma zraka, zraka svjetlosti će se lomiti i zbog toga se na kameri neće vidjeti uniformna distribucija svjetlosti. Dakle, kad zrake svjetlosti krenu iz izvora svjetlosti, svjetlost se lomi na objektu koji se promatra, odbija se od zrcala i dolazi do kamere. Oštar rub se postavlja na mjesto gdje se obijene zrake fokusiraju, dakle na udaljenost $2f$ od konkavnog paraboličnog zrcala.

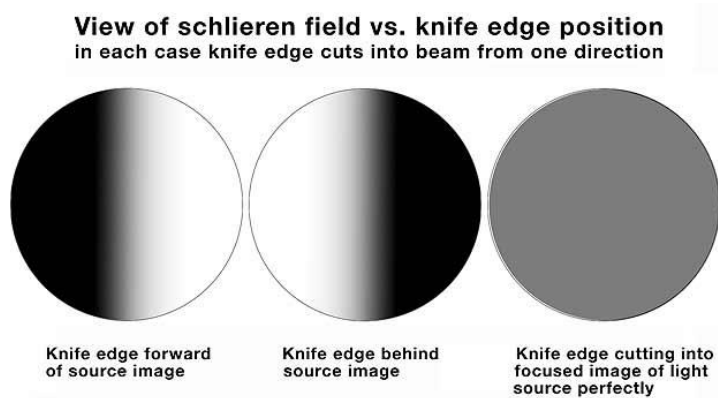
4.1. Oštar rub

Uloga oštrog ruba u Schlierenovoj metodi je blokiranje pola svjetlosti koja dolazi od zrcala do kamere. Ako ispred zrcala nema prepreke, odnosno ako je ispred zrcala tvar koja ima uniformnu optičku gustoću, dakle, stalan indeks loma, svjetlost koja dolazi do kamere bit će duplo manjega intenziteta u usporedbi kad nema oštrog ruba. Da bi svjetlost bila duplo manjega intenziteta (Slika 19), oštar rub moramo postaviti točno tako da blokira polovicu slike točkastoga izvora na udaljenosti $2f$ od zrcala.



Slika 19. Uniformna distribucija svjetlosti na visokokvalitetnomu zrcalu s oštrim rubom kao preprekom [10].

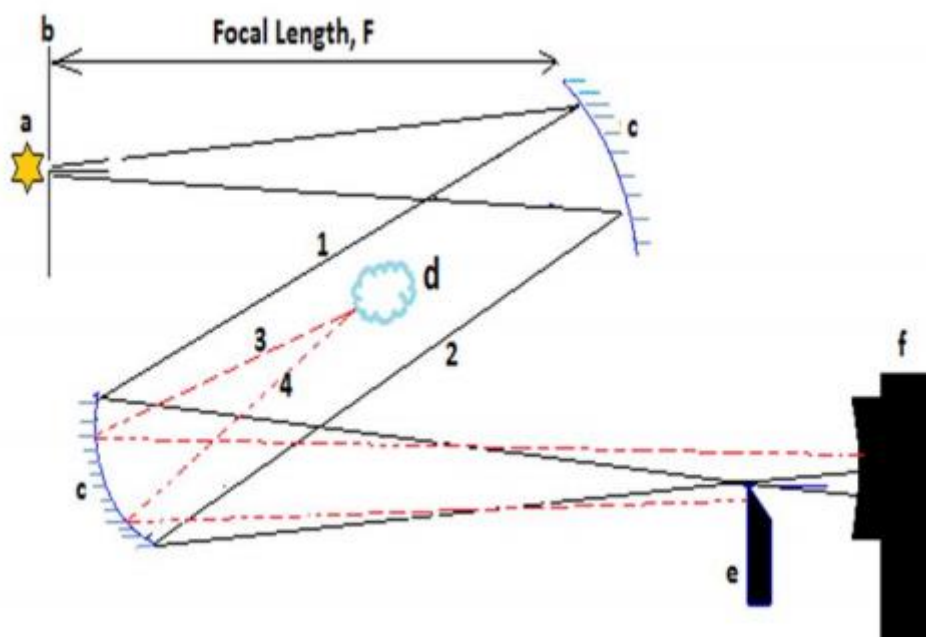
Ako postavimo oštar rub na udaljenosti većoj ili manjoj od $2f$, tada će oštar rub prekriti samo lijevu ili desnu polovicu slike, ovisno jesmo li na udaljenosti većoj ili manjoj od $2f$. Na slici ispod (Slika 20) prikazano je kako će izgledati slika ako postavimo oštar rub na udaljenosti manjoj od $2f$ (lijevo), većoj od $2f$ (u sredini) i na udaljenosti točno $2f$ (desno).



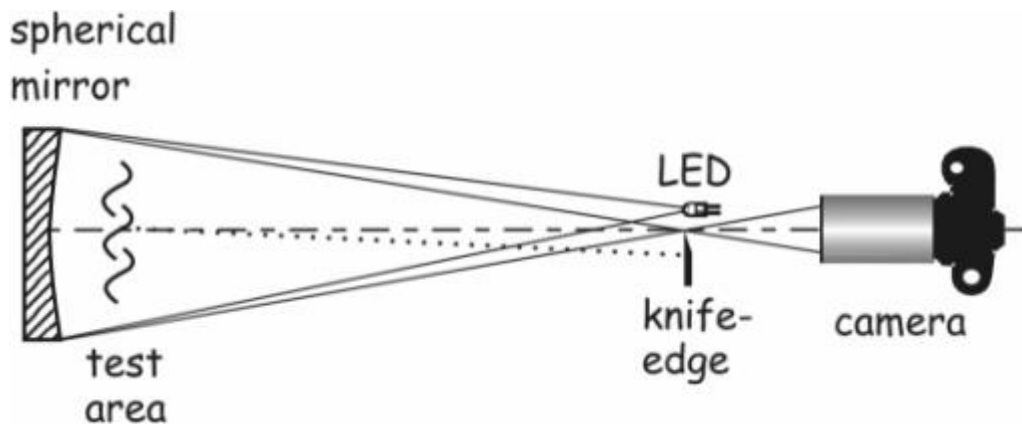
Slika 20. Prikaz slike ovisno o položaju oštrog ruba [11].

Kad ispred zrcala stavimo medij koji promatramo, svjetlost se lomi na tome mediju. Oštrim rubom blokiramo pola svjetlosti jer se na nekomu mjestu svjetlost može lomiti na mediju u više smjerova i dolazi do kamere. Naposljetku dobijemo svijetlu sliku s malo kontrasta. Kada uvedemo oštar rub, dio svjetlosti, koji se od istoga mjesta lomio u više smjerova, postaje sjena (budući da taj dio blokira žileta) i dobivamo sliku s više kontrasta.

Na slici ispod (Slika 21) koristi se Schlierenova kamera s dvama zrcalima, ali princip rada je isti i jasnije je vidljiva uloga oštrog ruba u postavu.



Slika 21. Schlierenova metoda s dvama zrcalima i uloga oštrog ruba [12].

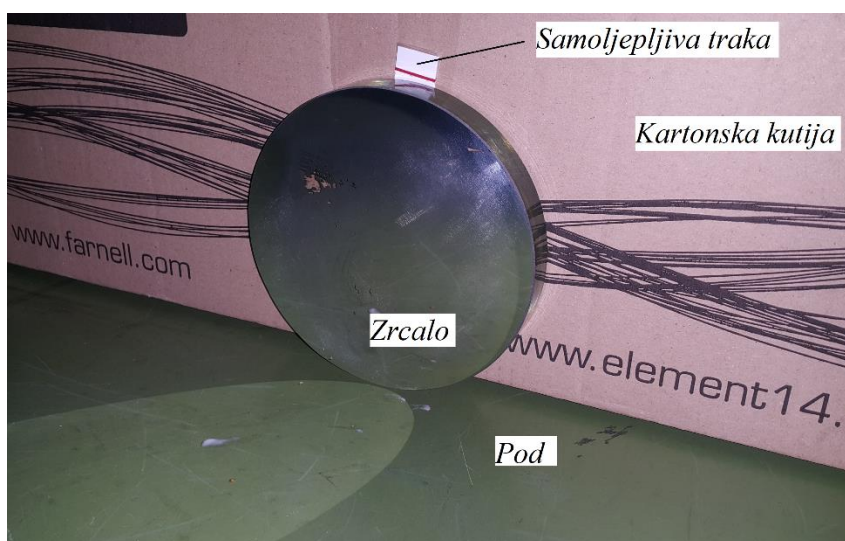


Slika 22. Schlierenova metoda s jednim zrcalom i uloga oštrog ruba [13].

5. Tijek eksperimenta

Nakon vađenja zrcala iz kutije, najprije je valjalo ulaštiti zrcalo da bi površina zrcala bila što glatkija, a samim time i bolja kvaliteta dobivenih slika. Nakon laštenja zrcala, bilo je potrebno postaviti i fiksirati zrcalo. Bitno je napomenuti da nam je radna površina bio pod, a dva su razloga tomu. Prvo, pod je stabilan, ne trese se, a budući da postav mora biti jako precizno postavljen, postavljanjem svega na pod umanjili smo vibracije koje bi se osjetile ako bismo, primjerice, slučajno udarili u stol ili slično. Mogla se koristiti i optička klupa, ali tu dolazimo do drugoga razloga. Kao što je spomenuto, cilj ovoga rada je između ostaloga pokazati da za ovaj eksperiment nije potrebna profesionalna oprema osim kvalitetnoga zrcala i da se eksperiment može izvesti gotovo svugdje, pa čak i tamo gdje nema dovoljno dugačkoga stola za postav ili stalaka.

Dakle, ulašteno zrcalo bilo je fiksirano na običnu kartonsku kutijubdvostranom samoljepljivom trakom (Slika 22).

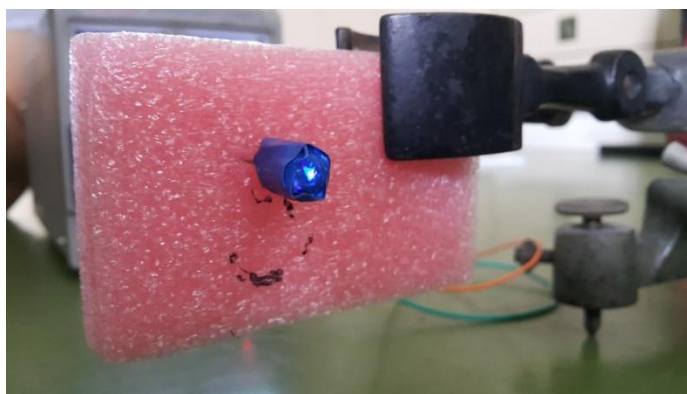


Slika 22. Zrcalo fiksirano samoljepljivom trakom na kutiju.

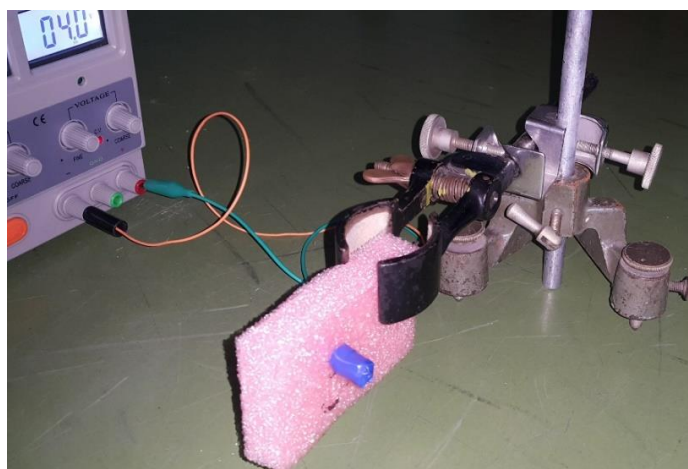
Nakon toga bilo je potrebno odrediti udaljenost dvije žarišne duljine od zrcala, a to je bilo određeno usmjeravanjem mobitela s bljeskalicom (također LED žarulja) prema zrcalu. Zajedno s mobitelom držao sam dio kartonske kutije koja je bila u ravnini s mobitelom. Budući da se radi o konvergentnomu zrcalu, kad se predmet (ili u ovom slučaju točkasti izvor svjetlosti) nalazi na udaljenosti $2f$, tada će i slika biti na istoj udaljenosti (u ovom slučaju svjetlosne zrake izvora fokusirane u jednu točku). Dakle, na

kartonu sam pratio položaj u kojemu će snop svjetlosti biti najmanji (točka) i kad sam to postigao, znao sam da se nalazim na udaljenosti $2f$ od zrcala. Već je spomenuto da se na toj udaljenosti moraju nalaziti izvor svjetlosti i oštar rub. Nakon toga sam morao prilagoditi LED žarulju da bude što *točkastiji* izvor svjetlosti, a to je napravljeno omotavanjem LED žarulje neprozirnom izolacijskom trakom i rezanjem te iste trake da bi nastao mali točkasti otvor na vrhu žarulje.

Sljedeći korak bio je pričvrstiti izvor svjetlosti, u ovom slučaju LED žarulju. Pritom je poslužila obična plastična spužva kakva se koristi pri zaštiti od lomljenja raznih predmeta. Izrezan je kvadar od dijela plastične spužve, a nožicama (pinovima) LED žarulje probušena je spužva i pričvršćena LED žarulja. Spužva je pričvršćena stalkom da bi bila stabilna (Slika 23). LED žarulja spojena je na izvor istosmjerne struje, u ovom slučaju laboratorijski ispravljač (Slika 24.). Kao izvor struje može se koristiti i baterija, adapter ili punjač za mobitel.

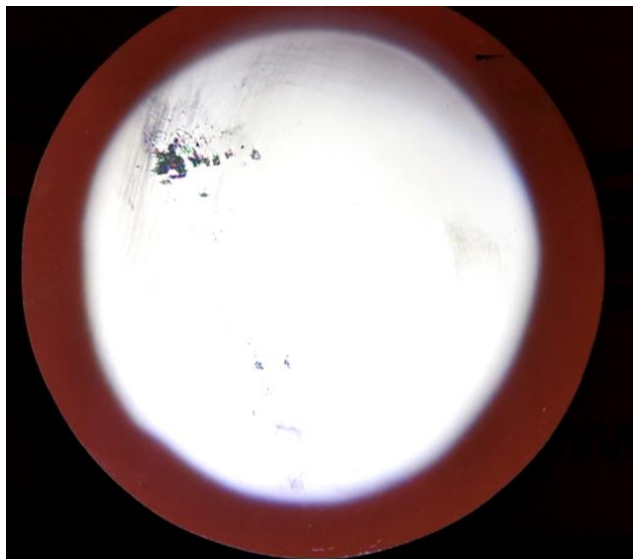


Slika 23. LED žarulja na spužvi koja je pričvršćena sa stalkom.



Slika 24. LED žarulja spojena na izvor struje.

U sljedećemu koraku bilo je potrebno namjestiti kameru na odgovarajuće mjesto na udaljenosti od zrcala malo većoj od $2f$. Kao što je već opisano, kamera ima svoju leću koja će opet dodatno fokusirati svjetlost. Optimalan je način pronalaska odgovarajućega mjesta traženjem slike na kameri tako da dobijemo sliku svjetlosti na zrcalu tako da imamo uniformnu distribuciju svjetlosti na zrcalu (Slika 25). Razlog zbog kojega u ovom slučaju nemamo savršenu uniformnu distribuciju svjetlosti je oštećenje leće pa se samim time vide spomenuta oštećenja.



Slika 25. Uniformna distribucija svjetlosti na zrcalu nakon namještanja kamere na odgovarajuće mjesto.

Zadnji korak bio je namjestiti oštar rub na udaljenosti $2f$ od zrcala i prekriti oštrim rubom polovicu fokusirane svjetlosti iz razloga koji je objašnjen u prethodnomu poglavlju. Prvo smo kao oštar rub koristili oštricu skalpela koji smo pričvrstili na plastičnu spužvu (Slika 26), a nakon toga je ulogu oštrog ruba imao žilet koji smo pričvrstili stalkom (Slika 27).

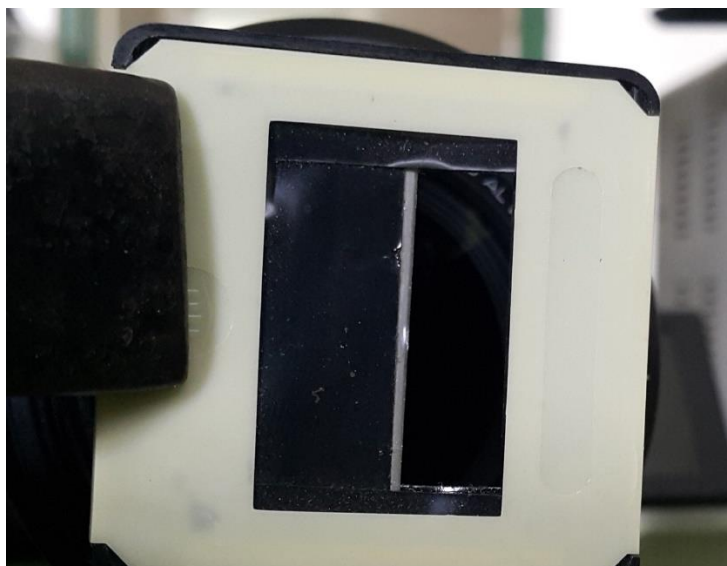


Slika 26. Kamera i oštrica skalpela u ulozi oštrog ruba.

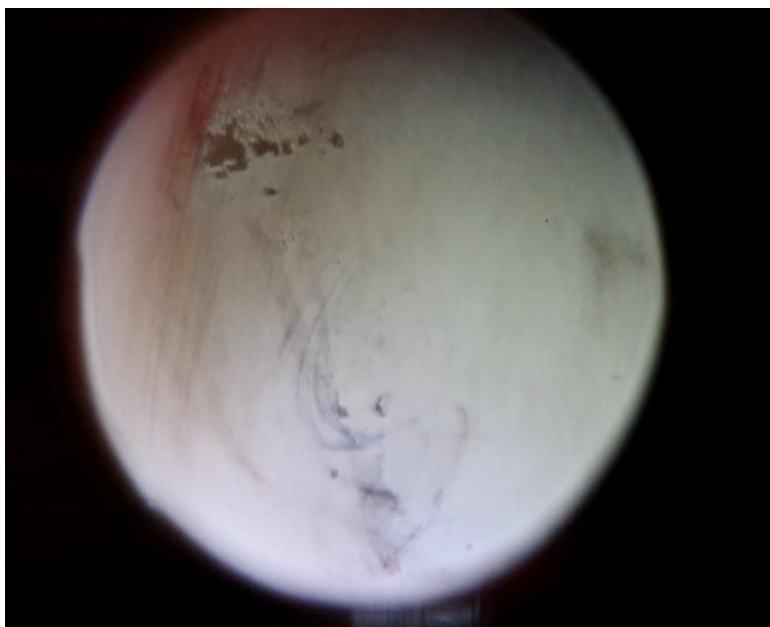


Slika 27. Kamera i žilet u ulozi oštrog ruba.

Jesmo li smo skalpel ili žilet namjestili na odgovarajuće mjesto, mogli smo provjeriti na dva načina. Prvi način je taj da gledamo žilet kada ga namještamo i pratimo kada će točkica fokusirane svjetlosti biti napola prekrivena žiletom (Slika 28). Drugi način je taj da pratimo sliku u kameri i namještamo žilet tako dugo dok ne dobijemo uniformnu distribuciju svjetlosti na kameri, ali duplo manjega intenziteta u odnosu na situaciju bez žileta (Slika 29).



Slika 28. Svjetlost napola prekrivena žiletom.

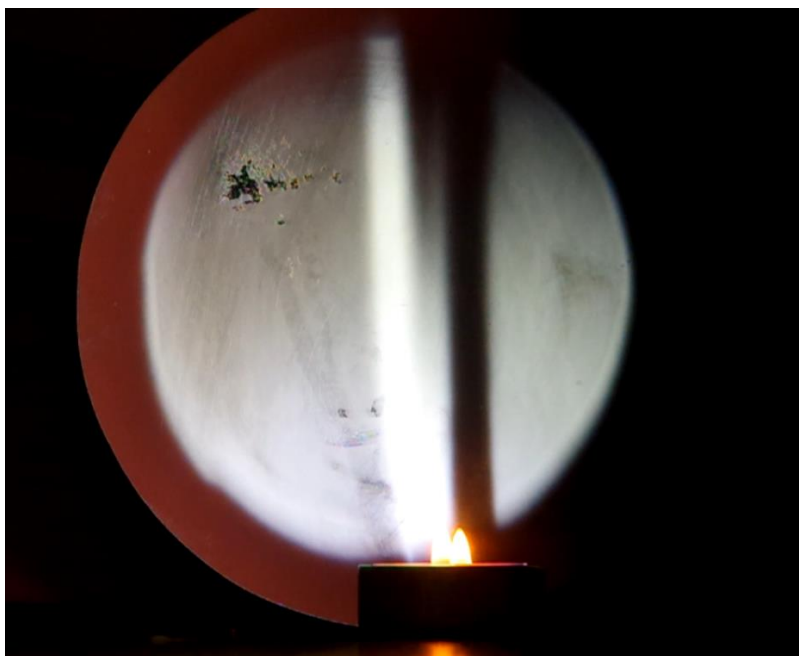


Slika 29. Slika svjetlosti iz zrcala kad je žilet u upotrebi i na odgovarajućemu položaju.

6. Snimke

Ispred zrcala stavili smo svijeću koja gori, zapaljeni higijenski štapić s vatom, izopropilni alkohol, ljudsku ruku, helij, zagrijanu lemilicu i etanol. Prema relaciji (9), indeks loma zraka temperature različite od sobne trebao bi biti različit od indeksa loma zraka koji je sobne temperature.

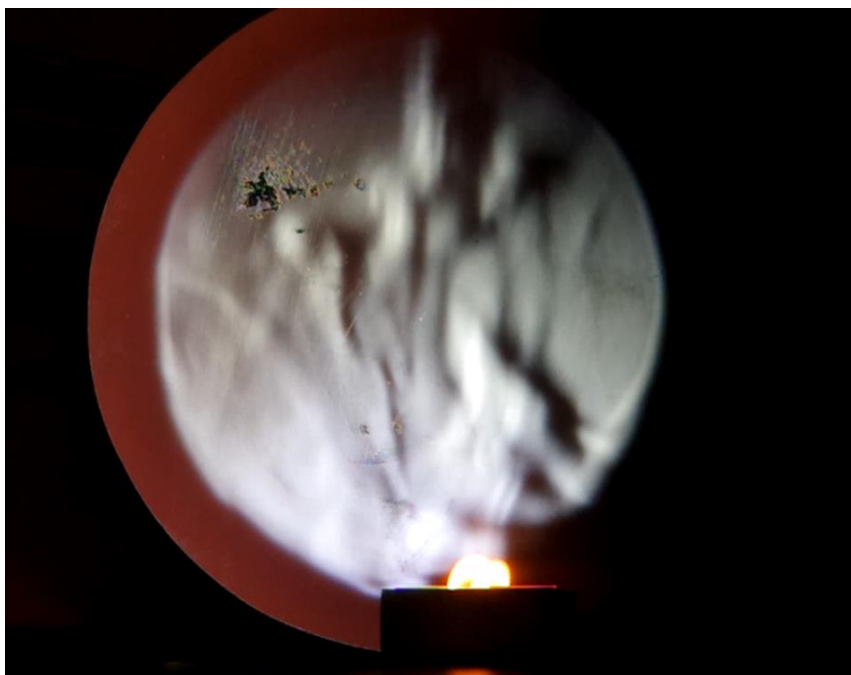
Navedenim postavom snimljeno je nekoliko snimaka u raznim varijacijama. Snimke s oštrim rubom i bez oštrog ruba su prikazane u prethodnom poglavlju (4.1). Prvo smo koristili oštricu skalpela uložiti oštrog ruba. Za početak smo snimali plamen svijeće koja mirno gori (Slika 30).



Slika 30. Plamen svijeće koja mirno gori i topli zrak koji se izdiže iz svijeće (skalpel u uložiti oštrog ruba).

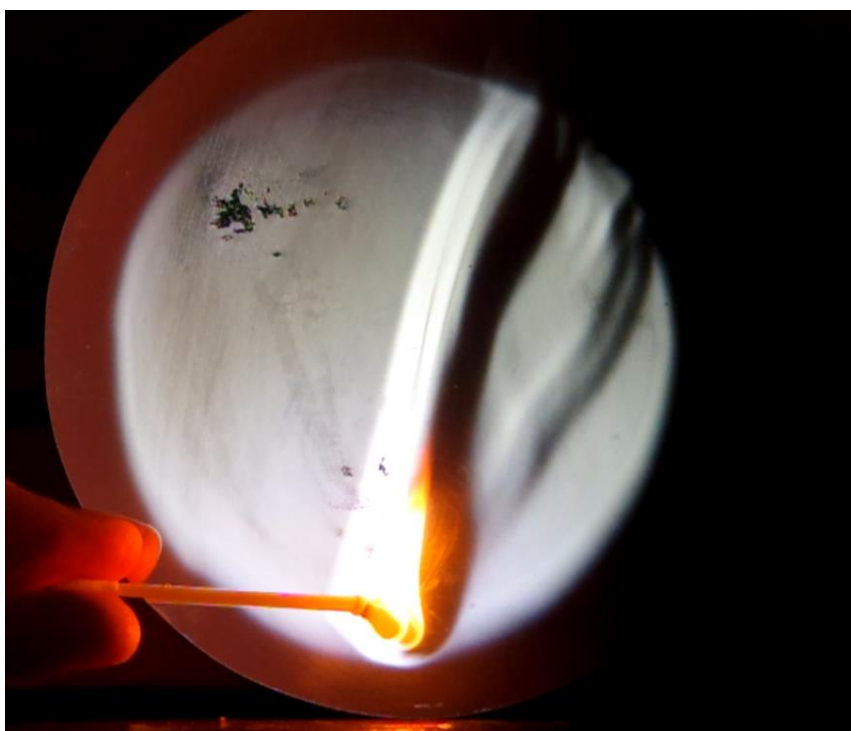
Na slici se može vidjeti ono što se inače ne može golim okom – kako se topli zrak uzdiže iz plamena svijeće. Topli zrak ima drugačiji indeks loma od hladnoga zraka oko njega i upravo je to smisao Schlierenove kamere. Da vidimo i snimimo medije koji imaju različite, ali ujedno i jako slične indekse loma što ne bismo mogli vidjeti golim okom.

Slijedi snimka plamena nakon što sam puhnuo prema njemu i na slici je vidljivo raspršenje toploga zraka (Slika 31).



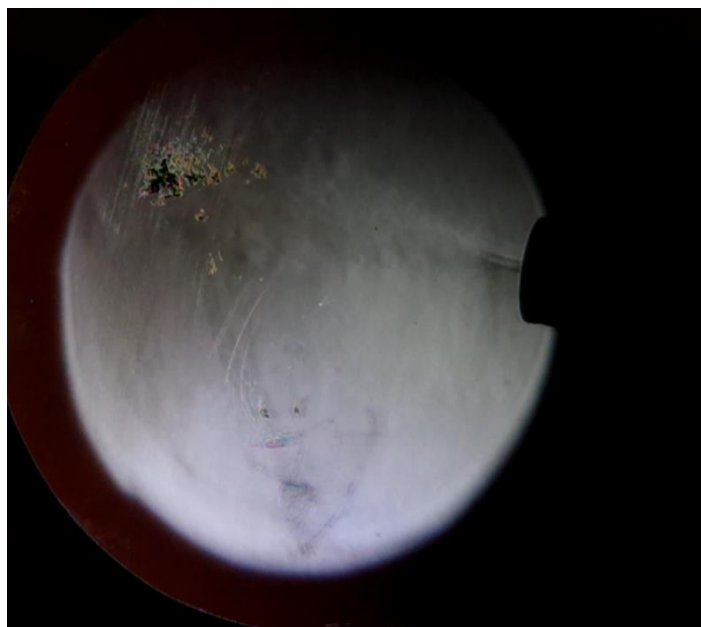
Slika 31. Nakon što smo puhнули prema svijeći (skalpel u ulazi oštrog ruba).

Nakon toga zapalio sam higijenski štapić s vatom (štapić za uši) i snimio gorenje štapića (Slika 32).



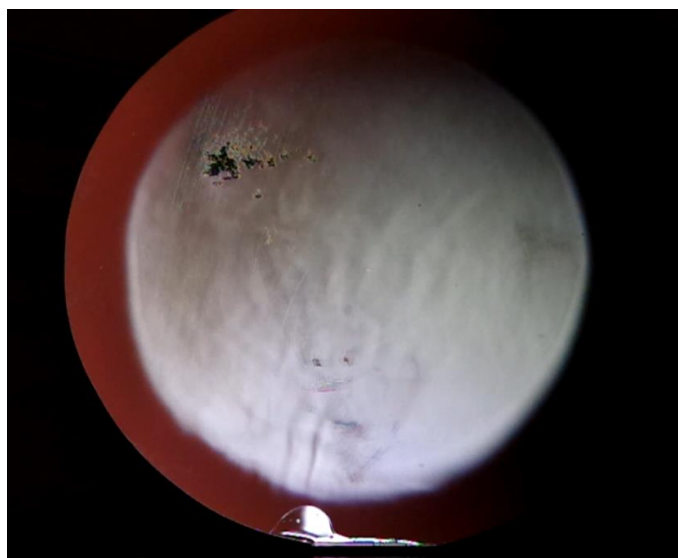
Slika 32. Gorenje higijenskoga štapića s vatom.

Zatim smo uzeli bocu izopropilnoga alkohola i stisnuli bocu da iz nje izađe para (Slika 33). U ovom slučaju vidljiva je još jedna upotreba Schlierenove kamere. Kod svijeće smo vidjeli da zrak različitih temperatura ima različit indeks loma, a u ovom je slučaju vidljivo kako tvari različitoga kemijskog sastava imaju također različite indekse loma. Taj slučaj također nije vidljiv golim okom, ali pomoću Schlierenove kamere postaje vidljivim.



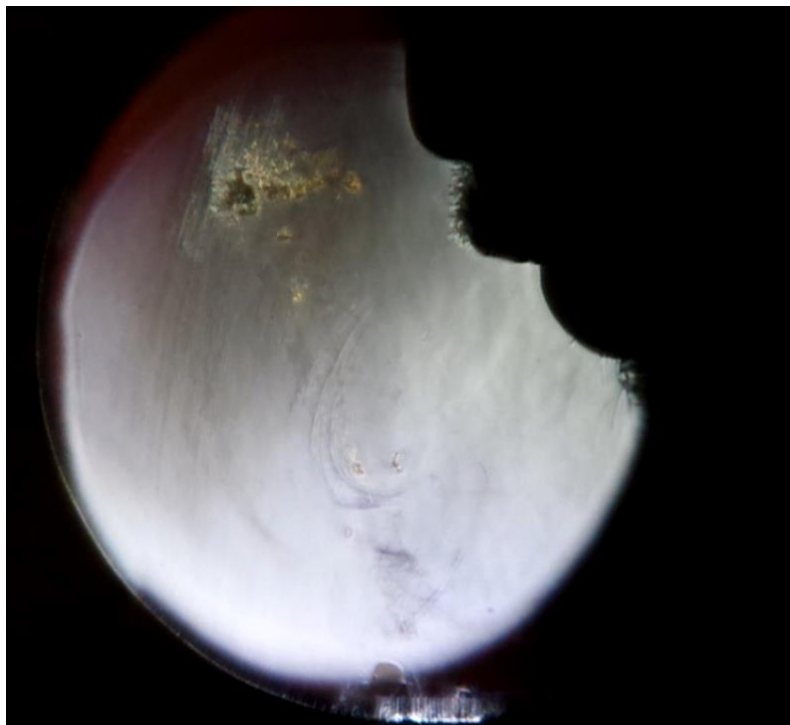
Slika 33. Ispuhivanje pare izopropilnoga alkohola.

Nakon toga proliveno je malo izopropilnoga alkohola na pod ispred zrcala i na slici ispod (Slika 34) vidljivo je njegovo isparavanje.



Slika 34. Isparavanje izopropilnoga alkohola.

Zatim se nastojalo ispitati može li se vidjeti kako ljudsko tijelo grije okolni zrak. Za početak sam ispustio dah prema zrcalu (Slika 35), a nakon toga stavio sam ruku ispred zrcala (Slika 36).



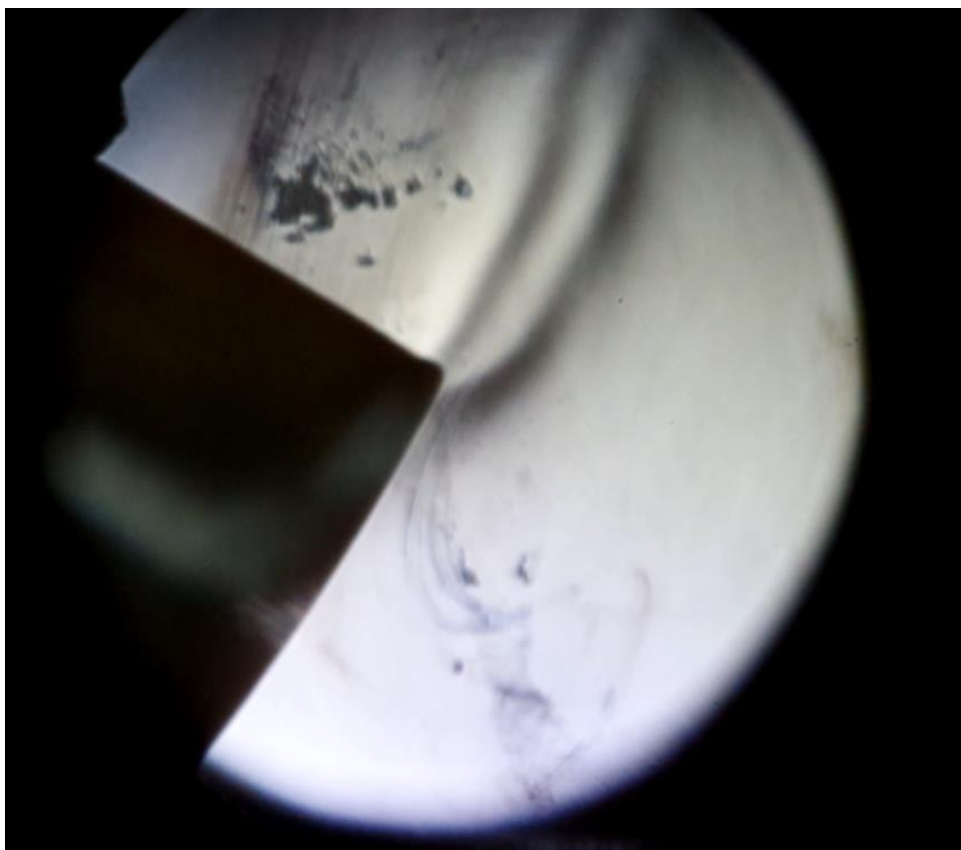
Slika 35. Ljudski dah



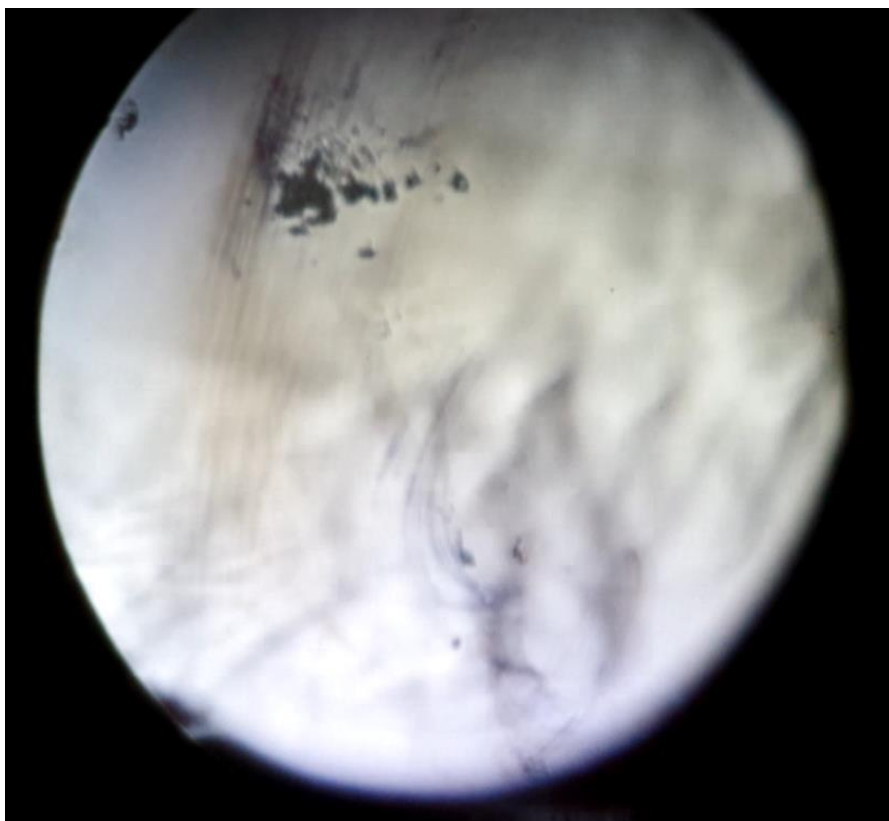
Slika 36. Ruka ispred zrcala.

Na fotografiji je vidljivo (iako slabije) da se može snimiti i konvekcija topline iz ljudskoga tijela uz pomoć Schlierenove kamere. Na videosnimkama to je puno vidljivije jer je fotografija stacionarna, a na videosnimci vidi se tok gibanja toplijega zraka.

Zatim smo uzeli čašu koju smo napunili helijem. Budući da je helij lakši od zraka, čaša je okrenuta naopako da bi se mogla napuniti. Nakon toga smo lagano ispred kamere okretali čašu da helij počne izlaziti iz nje i snimili kamerom (Slika 37). Zatim smo uzeli bocu helija pod tlakom, otvorili ventil i usmjerili ga prema zrcalu (Slika 38 i 39).



Slika 37. Helij istječe iz čaše „prema gore“.

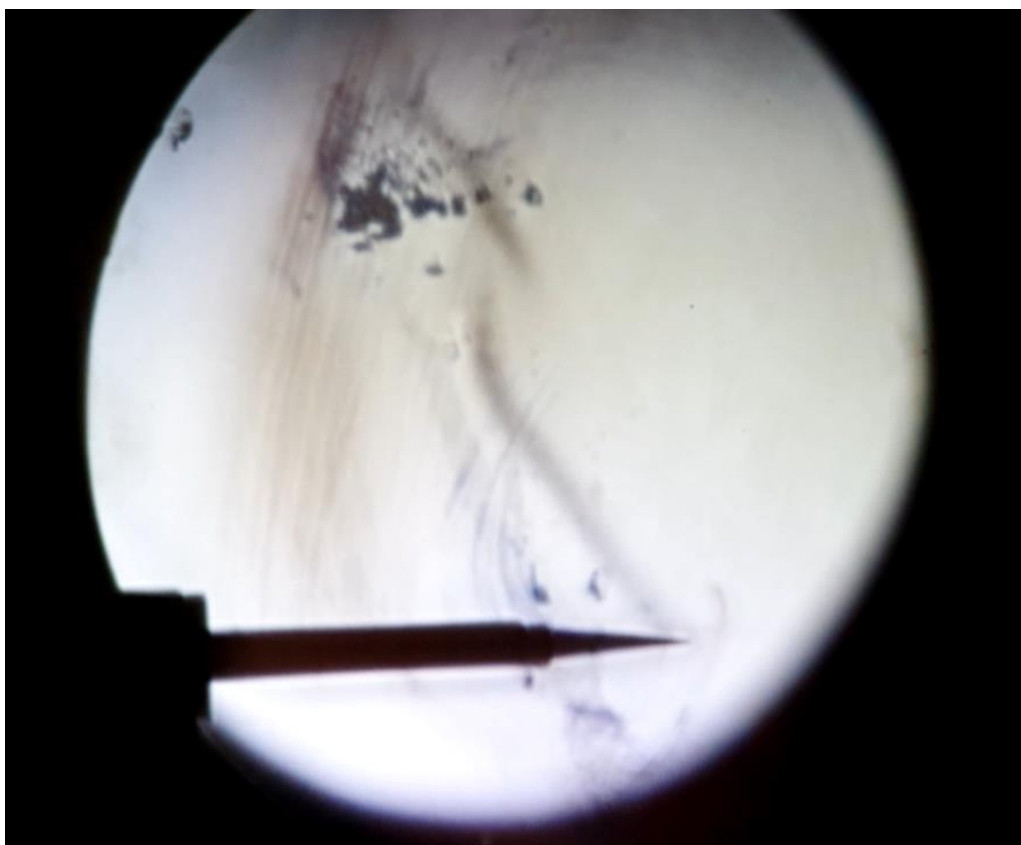


Slika 38. Puštanje helija iz boce pod tlakom.



Slika 39. Puštanje helija iz boce pod tlakom (2).

Helij, iako nevidljiv golomu oku, moguće je snimiti Schlierenovom kamerom. Nakon helija uključili smo lemilicu da bismo vidjeli kako izgleda snimka širenja toploga zraka iz vrućega krutog tijela (Slika 40). Znamo da vrh lemilice ima najvišu temperaturu, a to smo potvrdili i snimkom na kojoj se vidi da zrak iznad vrha lemilice ima najviše različit indeks loma u odnosu na okolni zrak, a samim time može se zaključiti da je ta temperatura zraka viša od temperature okolnoga zraka.



Slika 40. Lemilica ispred zrcala.

Na fotografijama je vidljiv efekt koji se dobije Schlierenovom kamerom, ali daleko bolji dojam dobije se kada se gleda videosnimka iz razloga koji je već objašnjen – na videosnimci se vidi tok gibanja medija s različitim indeksom loma od indeksa loma zraka.

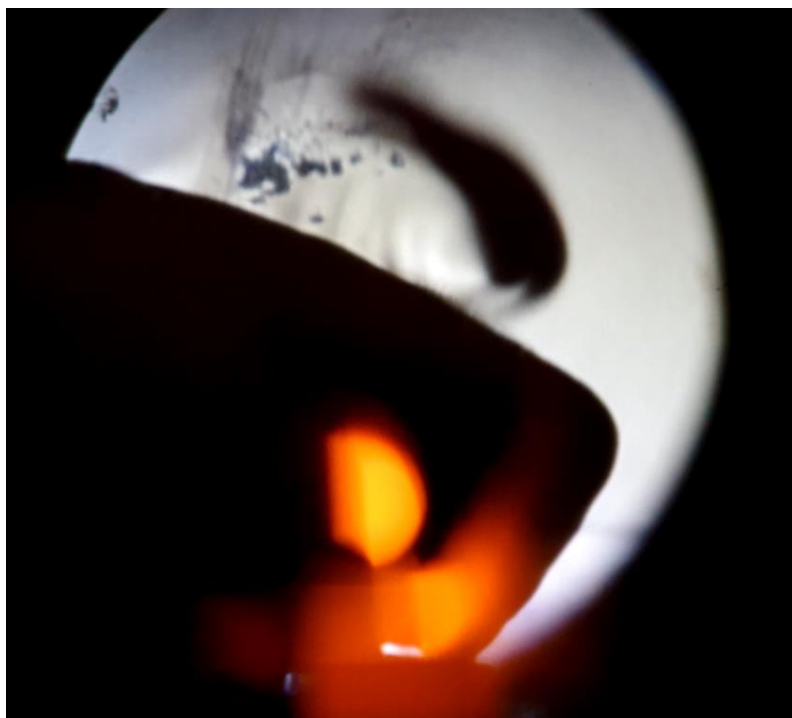
7. Određivanje temperature plamena alkohola

U ovom dijelu rada nastojala se odrediti temperatura plamena alkohola, točnije etanola, koji je prethodno zapaljen. Alkohol smo ulili u čep i stavili ga ispred zrcala (Slika 41)



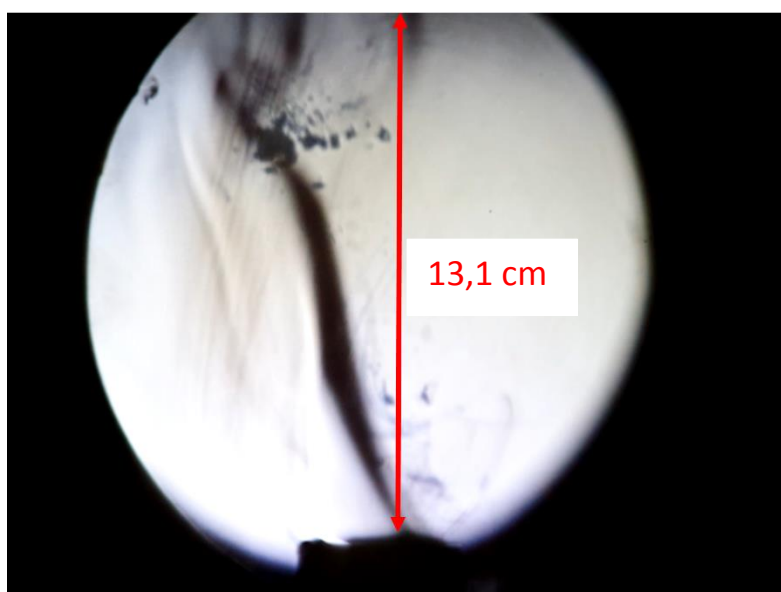
Slika 41. Alkohol ispred zrcala.

Nakon toga smo zapalili alkohol (Slika 42) i pustili neka gori ispred zrcala.



Slika 42. Paljenje alkohola.

Potom smo snimili gorenje alkohola i pomoću računala sam pokušao odrediti temperaturu plamena. Znamo da je visina zrcala jednaka $h = 15$ cm. Budući da se na snimci ne vidi cijelo zrcalo, programom *Microsoft PowerPoint* odredio sam kolika je visina od čepa do vrha snimke, gdje je dio zrcala *odrezan* i nije stao u kadar. Budući da se bez poteškoća može odrediti horizontalni promjer koji je jednak visini zrcala, jednostavnim skaliranjem može se odrediti i udaljenost s od čepa do vrha snimke. Kao rezultat dobio sam da je udaljenost $s = 13.1$ cm (Slika 43).



Slika 43. Udaljenost od čepa do vrha snimke.

Kod izračuna je potrebno napraviti nekoliko aproksimacija. Prvo, kada topli zrak putuje prema gore, on konstantno gubi toplinu zbog okolnoga zraka. Ipak, ako uzmemo u obzir da promatramo dovoljno kratak put, taj prijelaz topline na okolinu može se zanemariti. Početna brzina zraka koji se uzdiže je $v_0 = 0$ m/s. Ako se još pretpostavi da topli zrak ima stalnu akceleraciju, može se koristiti izraz:

$$a = \ddot{z} = \frac{2s}{t^2} \quad (22)$$

Za segment vrućega zraka vrijedi 2. Newtonov zakon:

$$m\ddot{z} = \rho_o gV - mg \quad (23)$$

Pri čemu je m masa segmenta vrućega zraka, ρ_o je gustoća okolnoga zraka, V je obujam segmenta vrućega zraka i g je akceleracija sile teže. Podijeli li se relacija (23) s masom m , dobiva se izraz:

$$\ddot{z} = \rho_o g \frac{V}{m} - g \quad (24)$$

koji možemo zapisati u obliku:

$$\ddot{z} = g \left(\frac{\rho_o}{\rho_v} - 1 \right) \quad (25)$$

gdje je ρ_v gustoća segmenta vrućega zraka.

Pretpostavi li se da za vrući zrak i za okolni zrak vrijedi da su idealni plinovi i da je

$$T_v = T_o + \Delta T \quad (26)$$

pri čemu je T_v temperatura vrućega zraka, T_o je temperatura okolnoga zraka, a ΔT je promjena temperatura, možemo zapisati:

$$\ddot{z} = g \left(\frac{\rho_o - \rho_v}{\rho_v} \right) \quad (27).$$

Iz jednadžbe stanja idealnog plina vrijedi da je tlak vrućega zraka p_v jednak:

$$p_v = \rho_v \frac{RT_v}{M} \quad (28)$$

a tlak okolnoga zraka p_o :

$$p_o = \rho_o \frac{RT_o}{M} \quad (29)$$

Pretpostavi li se da je tlak vrućega zraka i hladnijega zraka jednak, $p_v = p_o$ i izjednače li se relacija (28) i relacija (29) dobiva se:

$$\rho_o = \rho_v \frac{T_v}{T_o} \quad (30)$$

Uvrstimo relaciju (26) u relaciju (30):

$$\rho_o = \rho_v \frac{T_o + \Delta T}{T_o} \quad (31).$$

Sada se relacija (31) može uvrstiti u relaciju (27) iz čega slijedi:

$$\ddot{z} = g \left(\frac{\rho_v \frac{T_o + \Delta T}{T_o} - \rho_v}{\rho_v} \right) \quad (32).$$

Daljnijim sređivanjem relacije (32) dolazi se do relacije:

$$\ddot{z} = g \left(\frac{\Delta T}{T_o} \right) \quad (33)$$

koju možemo zapisati i ovako:

$$\ddot{z} = a = g \left(\frac{T_v}{T_o} - 1 \right) \quad (34)$$

Uvrsti li relacija (34) u relaciju (22), dobiva se izraz:

$$T_v = T_o \left(\frac{2s}{gt^2} + 1 \right) \quad (35)$$

Sada kada je izveden izraz, potrebno je na snimci pronaći komadić toploga zraka i izmjeriti vrijeme potrebno da taj komadić prijeđe put od plamena do vrha snimke. *Frame rate* snimke je 59,94 fps (*frames per second*), što znači da se u jednoj sekundi videosnimke prikazuje 59,94 sličica. Iz toga možemo izračunati da je vrijeme između dvije sličice jednako $t_{2fr} = 0,01668$ s. Uzeo sam jedan segment videosnimke, pratio dio toploga zraka koji se diže iz plamena i mijenjao sličicu po sličicu dok plamen nije izašao iz kadra. Budući da je teško izolirati takav segment vrućega zraka, nisam bio u mogućnosti napraviti više mjerenja. Na slici ispod (Slika 44) označen je segment vrućega zraka koji sam pratio kako se uzdiže iz plamena i izlazi iz kadra.



Slika 44. Segment vrućega zraka koji se uzdiže iz plamena.

Broj sličica potreban da bi segment vrućeg zraka prošao udaljenost od plamena do vrha snimke, dakle $s = 13.1$ cm, je 11. Iz toga broja sličica može se lagano izračunati da je vrijeme potrebno zraku da napusti snimku $t = 0,18348$ s.

Kada ove podatke uvrstimo u relaciju (19) uz sobnu temperaturu $T_o = 300$ K i ubrzanje sile teže $g = 9,81$ m/s², dobijemo da je temperatura izgaranja plamena jednaka $T_v = 538$ K. Tablična vrijednost temperature plamena čistoga alkohola (etanola) je $T = 683$ K [14]. Mi smo imali 70 postotni etanol. Iako je očito da je pogreška velika, možemo biti zadovoljni rezultatom budući da je napravljeno dosta aproksimacija i određene su stvari zanemarene. Budući da sam očekivao da ću za rezultat dobiti vrijednost istoga reda veličine, rezultat je zadovoljavajući. Da smo imali na raspolaganju profesionalni pribor i alat te laboratorijske uvjete rada, rezultat bi dakako bio precizniji.

8. Metodički dio

U ovom poglavlju objašnjena je i prikazana primjena schlierenove kamere u nastavi fizike u osnovnim i srednjim školama i nastavna priprema za sat fizike.

8.1. *Primjena schlierenove kamere u nastavi fizike*

Schlierenova kamera u nastavi fizike može se primijeniti u osnovnoj školi i u srednjim školama iz različitih nastavnih cjelina. Primjerice, u osnovnoj školi Schlierenova se kamera može upotrijebiti u 7. razredu u nastavnoj cjelini *Prijelaz topline*. U toj nastavnoj cjelini se kao oblici vođenja topline između ostalih navode kondukcija i konvekcija topline. Budući da se pomoću schlierenove kamere može direktno vidjeti konvekcija topline, primjenom kamere učenici bi mogli vidjeti kako izgleda konvekcija. Isto tako, može im se pokazati konvekcija topline iz ljudskoga tijela te kako se pomoću kamere može posredno *vidjeti* i kondukcija, primjerice tijekom zagrijavanja lemilice. Prednost je što se kamera često može priključiti i na projektor.

U srednjim školama kamera se može upotrijebiti u okviru nastavne jedinice *Prijelaz* slično kao i u 7. razredu osnovne škole. Nadalje, u srednjim bi se školama schlierenova kamera mogla primijeniti u nastavnoj cjelini geometrijske optike, nastavna jedinica *Lom svjetlosti*. Tu se može promatrati kako se svjetlost lomi na različitim tvarima, ali i da indeks loma ovisi i temperaturi medija, kao što je opisano u ovomu radu.

8.2. Nastavna priprema

NASTAVNA PRIPREMA IZ FIZIKE

UČITELJ: Dino Pongrac

ŠKOLA: Osnovna škola

RAZRED: 7.

NASTAVNA JEDINICA: Prijelaz topline

PREDVIĐENI BROJ SATI: 1

OBRAZOVNI ISHODI (OČEKIVANA UČENIČKA POSTIGNUĆA)

(što će učenici znati/moći napraviti nakon sata i koje će sposobnosti učenici razvijati na satu)

- navesti prijelaze topline
- objasniti primjere prijelaza topline vođenjem, strujanjem i zračenjem
- razlikovati dobre i loše vodiče topline

ODGOJNI ISHODI

(koje će vrijednosti učenici usvajati tijekom sata)

- uvažavanje tuđega mišljenja
- parlamentarnost i demokratičnost
- izražavanje vlastitoga mišljenja
- razvijanje komunikacije

VRSTA NASTAVE: INTERAKTIVNA ISTRAŽIVAČKI USMJERENA NASTAVA

NASTAVNE METODE

1. Demonstracija pokusa

2. *Učeničko izvođenje pokusa /mjerenja u skupinama*

3. Metoda razgovora - usmjerena rasprava

4. *Kooperativno rješavanje zadataka u skupinama*

5. *Konceptualna pitanja s karticama*

6. Metoda pisanja /crtanja

7. *Učenički projekti/ seminari*

OBLICI RADA (odabrati)

1. Frontalni

2. *Individualni*

3. *Rad u skupinama*

4. *Rad u parovima*

KORELACIJA S DRUGIM PREDMETIMA

- kemija, tehnička kultura

NASTAVNA POMAGALA I SREDSTVA

Kreda, ploča, projektor, schlierenova kamera, pribor za pokus

LITERATURA

[1] Fizika 7; Vladimir Paar; Šk. Knjiga

[2] Fizika 7; Zambulka Beštak Kadić, Nada Brković, Planinka Pećina; Alfa

Uvodni dio: otvaranje problema, prikupljanje ideja, upoznavanje pojave

UVODNI PROBLEM: Zašto koristimo drvene kuhače kada kuhamo?

Pokus: U čašu stavimo metalnu i plastičnu žlicu, staklenu cjevčicu i drvenu kuhaču sličnih dužina. Na vrh namažemo malo maslaca ili margarina i na maslac zalijepimo pužiće za kuhanje. U čašu ulijemo vruću vodu i pratimo što će se dogoditi.

Učenici primjećuju da pužić koji je zalijepljen na metalnu žlicu prvi pada. Nakon toga pada na staklenoj cjevčici, dok se pužići na kuhači i plastičnoj žlici još drže.

Uz raspravu, učenici zaključuju da se metalna žlica najbrže zagrijala, otopio se maslac i zato je pužić pao.

Učenici zaključuju da neke tvari dobro vode toplinu, a neke loše. Razlikujemo toplinske vodiče i izolatore. Metali su dobri toplinski vodiči, dok drvo nije. Iz toga razloga učenici zaključuju da kuhača mora biti drvena jer je drvo toplinski izolator.

Prijelaz topline kada su tijela u dodiru nazivamo vođenje topline ili kondukcija.

Središnji dio: Kako nas radijator ili peć griju, a nismo u dodiru s njima?

Kako osjećamo toplinu iz radijatora i peći koji su na drugoj strani prostorije? Učenici su naučili da toplina prelazi s toplijega tijela na hladnije kad su ta tijela u dodiru. Kako nas onda griju radijator ili peć? Navodim učenike neka se podsjetite što je to tijelo. U fizikalnomu smislu je i zrak tijelo jer zauzima prostor (*Tijela i tvari*). Učenici povezuju da je radijator u *dodiru* sa zrakom, a zrak je u *dodiru* s nama. Budući da je zrak plin, takav način prijelaza topline nazivamo strujanje ili konvekcija. Na taj način se prenosi toplina i u tekućinama.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Možemo li vidjeti strujanje?

Pitam učenike možemo li vidjeti strujanje? Neki učenici će možda odgovoriti da su strujanje vidjeli kod vrućeg lima automobila ili slično. Nakon toga pitam učenike možemo li golim okom vidjeti primjerice strujanje toploga zraka oko zagrijane žlice vrućom vodom. Učenici odgovaraju da ne možemo. Ako netko kaže da možemo, zagrijemo žlicu, kažemo učeniku neka se približi, i neka kaže vidi li strujanje. Nakon što smo se uvjerali da ne možemo vidjeti strujanje zraka golim okom, predstavljam učenicima schlierenovu kameru. Objašnjavam učenicima da princip rada kamere u ovom trenutku nije bitan, ali ona nam omogućuje da vidimo strujanje toplijeg zraka. Nakon što spojim kameru na projektor, ispred zrcala stavljamo žlicu zgrijanu vrućom vodom. Na projektoru se vidi strujanje zraka oko žlice. Nakon toga pitam učenike jesu li primijetili kako je prostorija više temperature ako u prostoriji boravi puno ljudi. Kako je to moguće? Učenici odgovaraju da ljudska tijela griju okolni zrak pa zrak postaje topliji. Ako je tako, možemo li onda vidjeti kako ljudsko tijelo grije okolni zrak? Pozivam učenika neka stavi ruku ispred zrcala. Sada se vidi strujanje zraka oko ruke učenika. Pitam učenika kako će se ugrijati ako su mu ruke hladne. Učenik odgovara da će ih protrljati. Učenik trlja ruke i stavlja ispred kamere i vidljivo je jače strujanje zraka oko ruke čime možemo zaključiti da su ruke bile više zagrijane. Ispred kamere stavljamo plamen svijeće i učenici najjasnije vide kako se topli zrak širi iz zagrijanoga tijela.

Nakon toga pitam učenike što grije Zemlju? Učenici odgovaraju da nas grije Sunce. Kako je moguće da nas grije Sunce, a Zemlja i Sunce su jako udaljeni, a isto tako u svemiru nema zraka? Uvodimo zadnji oblik prijenosa topline, a to je zračenje ili radijacija. To je oblik prijenosa topline putem elektromagnetskoga zračenja.

Završni dio :

U završnomu dijelu sata učenici rješavaju konceptualne zadatke s karticama.

Prijelaz topline

- vođenje ili kondukcija – kada su dva tijela u dodiru (skica pokusa)
 - Vodiči topline – dobro provode toplinu (npr. metali)
 - Izolatori – loše provode toplinu (npr. drvo, plastika)
- strujanje ili konvekcija – prijenos topline u plinovima i tekućinama
 - možemo vidjeti schlierenovom kamerom
- zračenje ili radijacija – prijenos topline putem elektromagnetskih valova (npr. Sunce grije Zemlju)

9. Zaključak

U radu je pokazano kako se uz jednostavan i jeftin pribor te alat može sastaviti metoda kojom je moguće snimanje toka fluida, promjena u temperaturi ili promjena kemijskoga sastava tvari. Uz osnovno poznavanje principa rada zrcala, prirode i propagacije svjetlosti omogućeno je tumačenje raznih efekata koji su dobiveni Schlierenovom kamerom. Iako se danas metoda rjeđe koristi, može imati upotrebu u nastavi fizike ili aerodinamike za demonstraciju širenja topline, konvekcije i kondukcije ili pak pri proučavanju različitoga indeksa loma različitih tvari, odnosno optičke gustoće. Budući da ne zahtjeva skup pribor i omogućava objašnjavanje više fenomena, ovaj eksperiment je izrazito zanimljiva pojava u području fizike pa je zbog toga koristan, ali i poželjan u nastavi fizike.

10. Literatura

- [1] Degen, N. An Overview on Schlieren optics and its Applications, Zurich, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2012.
- [2] Hammoud, J., Krhač K., Lihtar I., Nikić M. Schlierenova metoda, Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet, 2018.
- [3] Young, H. D., Freedman R. A., Sears and Zemanky's university physics: with modern physics. – 13th ed. San Francisco: Pearson Education, 2012.
- [4] Settles, G. S., Schlieren and Shadowgraph Techniques: visualizing phenomena in transparent media. New York: Springer Verlag-Berlin Heidelberg, 2001.
- [5] Mazumdar, A. Principles and techniques of Schlieren imaging systems, New York, Columbia University, 2011.
- [6] Schmidt, B. Schlieren Visualization, Pasadena, California Institute of Technology, 2015.
- [7] Atcheson, B. Schlieren-Based Flow Imaging, Vancouver, University of British Columbia, 2007.
- [8] <https://www.quora.com/How-could-I-get-information-on-the-Hubble-Space-telescope-spherical-aberration>, 15.10.2018.
- [9] <https://curiosity.com/topics/why-did-we-put-glasses-on-the-hubble-telescope-curiosity/>, 15.10.2018.
- [10] <https://www.youtube.com/watch?v=kSectSljZlQ>, 15.10.2018.
- [11] <https://people.rit.edu/andpph/text-reflection-schlieren-two.html>, 15.10.2018.
- [12] <https://sites.google.com/site/nikhilreddypasul/projects/flow-visualization-technique>, 15.10.2018.
- [13] <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0021392>, 15.10.2018.

- [14] https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-ignition-temperatures-d_171.html,
15.10.2018.